Pedobiologia 36, 295–305 (1992)
Gustav Fischer Verlag Jena

Zoologisches Institut der Universität Wien, Österreich

Veränderungen der Mesofauna eines Buchenwaldes bei Säurebelastung

HUBERT KOPESZKI

Mit 8 Abbildungen

Synopsis: *Original scientific paper*

Soils in the infiltration zone of polluted stemflow in beech woods are often highly acidic and enriched with heavy metals. Over long periods of time, the soil properties in the infiltration zones show significant changes in chemical properties. Soil animals are influenced by alterations of these soil conditions. Their abundance and therefore the rate of decomposition decrease due to contamination by acids and heavy metals, the dominance and species composition alter and many species disappear in these burdened areas. The specific reactions of collembolans like *Mesaphorura hylophila*, *Isotoma notabilis* and *Isotomiella minor* allow us to infer their indicator value for soil properties.

Key words: acid stemflow, soil animals, Collembola, indicator value, decomposition, organic matter.

1. Einleitung

Die europäischen Waldökosysteme sind derzeit einer ständigen anthropogenen Schadstoffbelastung ausgesetzt. Schwermetalleintrag, Stickstoffüberdüngung, Ozonbelastung und Säuredeposition tragen zum multifaktoriell bedingten Waldsterben erheblich bei (Anonym. 1987, 1989). Aber nicht nur die Bäume erkranken, auch der Waldboden wird durch den Schadstoffeintrag belastet. Die im Boden ablaufenden Mineralisierungs- und Humifizierungsprozesse werden nachhaltig beeinträchtigt; eine Störung des Nährstoffhaushaltes ist die Folge (GLATZEL, 1987).

Zahlreiche bodenzoologische Studien weisen auf die wichtige Tätigkeit der Bodenfauna bei Streuabbau- und Mineralisierungsvorgängen hin (BECK, 1983; FRITZLAR, DUNGER & SCHÄLLER, 1986; TAKEDA, 1988). Durch Schadstoffdeposition werden aber auch diese Bodenorganismen Stressoren ausgesetzt, von denen derzeit nicht abschätzbar ist, welche weiteren Folgen sie für das Bodenökosystem haben. Viele Bodenorganismen reagieren aber äußerst sensitiv auf Schadstoffe; sie können eventuell als Bioindikatoren für eine Veränderung von Bodenökosystemen herangezogen werden (FUNKE, 1986, 1987; GHILAROV, 1978; 1980; KOPESZKI, SCHALLER & CHRISTIAN, 1987; KOPESZKI, 1988; PRASSE, 1980).

Ziel der vorliegenden Studie war es daher, festzustellen, welche am Streuabbau beteiligten Tiergruppen eines Buchenwaldbodens überhaupt auf Schwermetall- und Säurebelastung (Bioindikatorfrage) reagieren und welche faunistischen Veränderungen in kontaminierten Bereichen ablaufen. Als weiteres Ziel sollten potentielle säurespezifische Bioindikatoren bei den Collembolen ermittelt werden.

2. Standort und Methoden

Für die Untersuchung wurde ein pedologisch und immissionsökologisch gut dokumentierter Buchenwaldstandort am Stadtrand von Wien (Exelberg) gewählt. Der erhöhte Eintrag von Säuren

(96 kg Sulfat, 65 kg Nitrat pro ha und Jahr) und Schwermetallen (z. B. Pb 200 g, Cd 70 g pro ha und Jahr), aber vor allem der relativ hohe Stickstoffeintrag (32 kg Gesamtstickstoff pro ha und Jahr) konnte durch detaillierte Messungen nachgewiesen werden (GLATZEL, KAZDA & LINDEBNER, 1986; die genauen Meßdaten sind dieser Arbeit zu entnehmen). Die Böden sind Pseudogleye auf unterschiedlich kalkhaltigen Flyschsandsteinen (Angaben zu den Versuchsflächen: KAZDA & GLATZEL, 1984).

Die Bäume (100–200 a) zeigen gleichmäßige Kronenentwicklung und meist konzentrierten Stammablauf. Dabei leiten Buchen bis zu 30% des Gesamtniederschlages als Stammabfluß zum Boden (KAZDA, GLATZEL & LINDEBNER, 1986). Die Böden um den Stammfuß sind durch den Eintrag von Säuren und Schwermetallen derart belastet, daß es zu einem flächenhaften Absterben der krautigen Vegetation kommt („Todeskreise" im Stammbereich) (GLATZEL & KAZDA, 1985; GLATZEL, KAZDA & SIEGHART, 1986; KAZDA, 1983; KAZDA, GLATZEL & LINDEBNER, 1986). In den Baumfußtaschen verändert sich durch den Eintrag das Bodenprofil: es bildet sich ein O_H-Horizont von mehreren Zentimetern Mächtigkeit (SCHÄFER, 1986); selbst irreversibel mineralogische Umbauvorgänge können nachgewiesen werden (pers. Mitt. N. RAMPAZZO, 1989).

Für vier Bäume wurden je drei Probenpunkte entlang der Fallinie hangabwärts gewählt (Stammnähe, Kronenmitte und Traufe des Laubdaches) und drei entsprechende entlang der Fallinie hangaufwärts; der Mittelwert von vier Proben aus dem Zwischenstammbereich diente als Referenzwert. In monatlichen Abständen (Jänner–Dezember 1989) wurden von jedem Probenpunkt ein Bohrkern (∅ 4,8 cm) genommen und in zwei Tiefenstufen (0–5 cm, 5–10 cm) ausgewertet.

Der Säuregrad wurde als *p*H (in 0,1 mol KCl-Lösung) elektrometrisch gemessen.

Zur zoologischen Auswertung wurde die Mesofauna in einem modifizierten Berlese-Tullgren-Apparat ausgetrieben und in 70% Aethanol konserviert. Die Mesofauna wurde nach großen taxonomischen Gruppen aussortiert (Acari nur als Summe); die Collembolen auf Familienniveau bestimmt. Bei den Collembolen wurde für einzelne Monatsserien auch eine Artenliste aufgestellt und die Diversität berechnet. Der Umrechnungsfaktor beträgt bei den Abundanzberechnungen (Ind. $\times$ m^{-2}) pro ausgezähltem Tier eines Bodenbohrkernes 509.

3. Ergebnisse

3.1. Abundanz

Die Abundanz der Mesofauna wird durch den sauren Stammablauf stark verringert. Entlang des ganzjährig sehr steilen *p*H-Gradienten (Abb. 1 & Abb. 2) bildet sich ein deutlicher faunistischer Gradient: im Einsickerungsbereich wird die Mesofauna auf durchschnittlich 10000 Ind. $\times$ m^{-2} dezimiert und steigt erst außerhalb der „Todeskreise" (= abge-

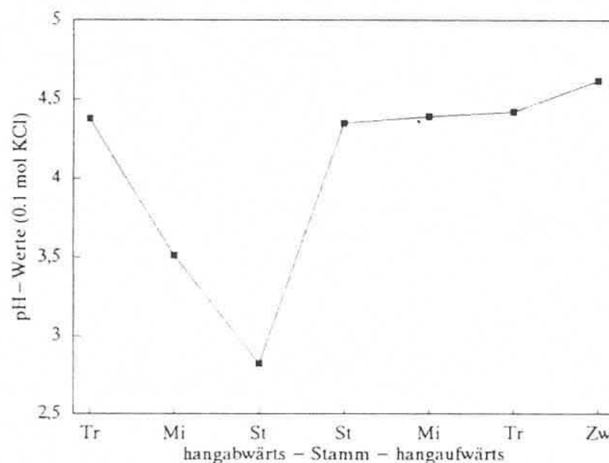


Abb. 1. Säuregradient durch Buchenstammablauf.
Exelberg Baum A, 1989 (Jahresdurchschnitt); ST = Stammnähe, MI = Kronenmitte; TR = Traufbereich; ZW = Zwischenstammbereich.

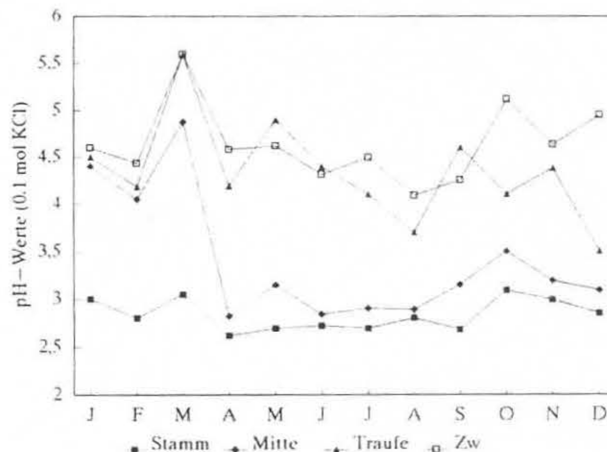


Abb. 2. *p*H-Werte im Jahresgang entlang der Fallinie hangabwärts und im Zwischenstammbereich.

storbene krautige Vegetation) auf rund 40000 Ind. × m^{-2} an (alle Werte sind Jahresmittelwerte); wie Abb. 3 zeigt, ist der faunistische Gradient hangaufwärts nur schwach ausgebildet.

Die Abundanzminderung trifft praktisch alle untersuchten Gruppen. Lediglich eine Collembolenart, *Mesaphorura hylophila*, kann im stark versauerten Bereich eine Populationssteigerung erzielen; die übrigen Springschwänze reagieren wie die übrige Mesofauna: mit abnehmender Entfernung vom Stamm fällt die Abundanz von rund 10000 Ind. × m^{-2} auf durchschnittlich 4000 Ind. × m^{-2} (Tab. 1).

Die dominierenden Arten *Isotomiella minor*, *Isotoma notabilis*, *Onychiurus granulosus* (Tab. 1) sind anscheinend acidophob (zumindest meiden sie die kontaminierten Baumfußtaschen); demgegenüber sind viele Arten aus der Unterfamilie der Tullbergiinen offensichtlich acidotolerant und erreichen die höchsten Wohndichten um den Stammfuß. Diese Ergebnisse stimmen mit Daten aus Coniferenforsten gut überein (BÅÅTH *et al.*, 1980; BENGTSSON & RUNDGREN, 1987; HÅGVAR, 1984).

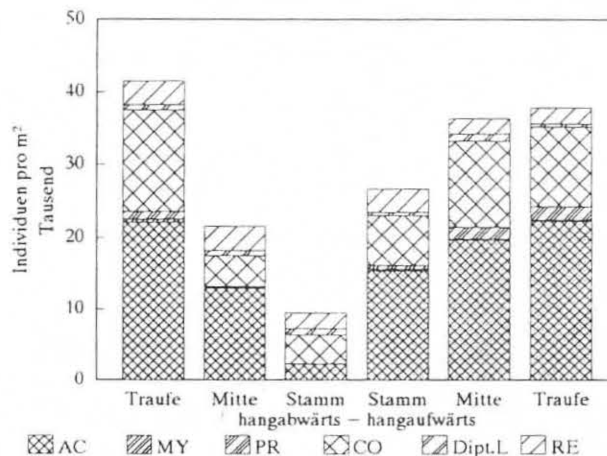


Abb. 3. Abundanzgradient der Mesofauna im Stammablaufbereich.
Exelberg Baum A 1989; AC = Acari, MY = Myriapoda, PR = Protura, CO = Collembola, Dipt. L = Diptera-Larven, RE = restliche Bodenfauna (Oligochaeta, Psocoptera, adulte Diptera, etc.); Abundanz (= Jahresmittelwert der Gesamtmesofauna pro m^2).

Tabelle 1. Mengendichten von Collembolen auf einer Toposequenz (entlang des *p*H-Gradienten vom Stamm bis zur Kronentraufe) unter einer Buche (Baum L; 02. 10. 89) am Exelberg bei Wien.

Namen der Arten	Mengendichten einiger Collembolenarten hangabwärts				hangaufwärts	
	Tr	Mi	St	↔ St	Mi	Tr
Onychiurus spec. A [juv., indet.]	+ +	.	.	.	.	.
Ceratophysella denticulata	+	.	.	.	.	.
Entomobrya lanuginosus	+ +	.	.	.	.	.
Mesaphorura hylophila	+ +	.	+ +	+	+	.
Onychiurus armatus	+ +	.	.	+ +	.	+ +
Neotullbergia tricuspis	.	.	.	.	.	+ +
Folsomia quadrioculata	.	.	.	.	.	+ +
Lepidocyrtus violaceus	.	.	.	.	.	+ +
Lepidocyrtus lignorum	.	.	.	.	+ +	+ +
Onychiurus granulosus	+ + + +	+ +	.	.	+ +	+ +
Isotoma notabilis	+ +	+ +	.	+ +	+ +	+ +
Isotomiella minor	+ + + +	+ +	.	+ + +	+ + +	+ + + +
Onychiurus sibiricus	.	+ +	.	+ +	+ +	.
Tomocerus baudoti	+	.	.	.	+ +	.
Orchesella spectabilis	.	+	.	.	.	.
Onychiurus spec. B [n. sp.?]	.	+	.	+	.	.
Entomobrya spec. A [juv., indet]	.		.	.	+	.
Summe:	70284	9168	1528	10186	13242	27503

Mengendichten in Form von Abundanz-Klassen: + < 1000, + + < 5000, + + + < 10000, + + + + > 10000 (Ind. m^{-2}).
Abkürzungen: Tr = Kronentraufe, Mi = Kronenmitte, St = Stamm.
Übersichtsinformationen über den *p*H-Gradienten auf der unteren Sequenz in Abb. 2.

3.2. Dominanz

Die dominierenden Gruppen in einem ungestörten (Buchen)waldökosystem sind Milben (rund 50%) (SEASTEDT, 1984), dicht gefolgt von Collembolen (rund ein Drittel der Gesamtmesofauna). Dieses Dominanzgefüge findet sich auch im Wienerwald im Zwischenstammbereich (Abb. 4) und der Traufzone. Lediglich im Einsickerungsbereich kommt es zu einer konstanten und auffälligen Veränderung der Faunenzusammensetzung: Hier dominieren die Collembolen (bis zu 45%). Hingegen treten die Milben oft bis auf ein Viertel der Gesamtabundanz zurück.

Das Dominanzspektrum der Collembolen zeigt die Veränderungen noch deutlicher: während im Stammbereich die Tullbergiinen bis zu 70% der Collembolenfauna ausmachen, gehen die üblicherweise dominierenden Isotomiden (Abb. 5) auf 10% zurück (Abb. 6). Mit zunehmender Entfernung vom Einsickerungsbereich des sauren Stammablaufes nehmen die Isotomiden, Onychiurinen, Entomobryiden u. a. Collembolengruppen prozentuell deutlich zu, die Tullbergiinen hingegen werden auf ihr „normales" Maß zurückgedrängt. Erst an der Traufe (in rund 2–3 m Entfernung vom Stamm) wird ein Dominanzspektrum erreicht, das den Referenzwerten des Zwischenstammbereiches entspricht und annähernd einem ungestörten Buchenwald ähnelt.

3.3. Diversität der Collembolen

Die Diversität der Mesofauna kann für die Charakterisierung von Bodeneigenschaften herangezogen werden (GHILAROV, 1980). Je reichhaltiger und diverser der Waldboden besiedelt ist, umso ökologisch stabiler ist er.

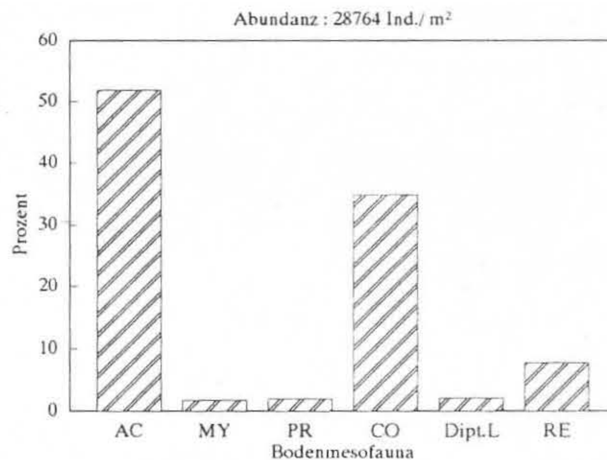


Abb. 4. Dominanzgefüge der Mesofauna im Zwischenstammbereich (Legende siehe Abb. 3). Abundanz = Jahresmittelwert 1989 (Exelberg).

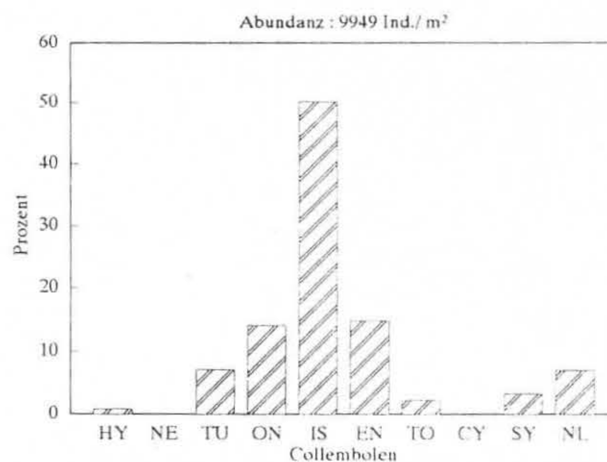


Abb. 5. Dominanzgefüge der Collembolen(unter)familien im Zwischenstammbereich. HY = Hypogastruridae, NE = Neanuridae, TU = Tullbergiinae, ON = Onychiurinae, IS = Isotomidae, EN = Entomobryidae, TO = Tomoceridae, CY = Cyphoderidae, SY = Symphypleona, NL = Neelipleona; Abundanz = Jahresmittelwert.

In den wenigen Monatsserien, die auf Artniveau determiniert wurden, konnten 34 Arten nachgewiesen werden (Artenliste im Anhang).

Im Einsickerungsbereich der untersuchten Bäume kommt fast ausschließlich eine Art, *Mesaphorura hylophila*, vor. Die anderen (innerhalb einer Jahresauswertung) hier festgestellten Arten kommen nur in geringer Abundanz vor. Wie die Abundanz, so steigt auch die Artendichte mit zunehmender Entfernung vom Stammfuß (von 3 auf 10 Arten) an und erreicht die höchsten Werte im Zwischenstammbereich (mit rund 25 Arten). Bei der Berechnung der Diversität (nach dem Shannon-Weaver-Index; SCHWERTFEGER, 1978) ergibt sich ein ähnliches Bild (Abb. 7): geringste Diversität in Stammnähe, höchste an der Traufe bzw. im Zwischenstammbereich.

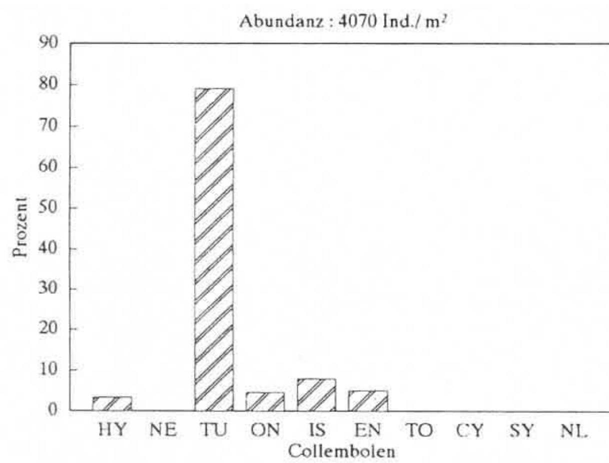


Abb. 6. Dominanzstruktur der Collembolen im Einsickerungsbereich des sauren Stammablaufwassers. Jahresmittelwerte Baum A; Legende siehe Abb. 5.

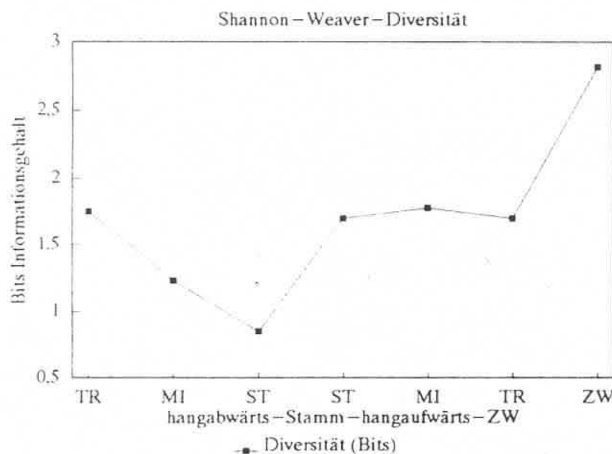


Abb. 7. Diversitätsindices (Shannon-Weaver-Index) der Collembolen entlang des *p*H-Gradienten (Legende siehe Abb. 1).

4. Diskussion

4.1. Allgemeines

Veränderungen der Bodenfauna durch Schadstoffbelastung sind Gegenstand zahlreicher Untersuchungen (FUNKE, 1986, 1987; BECK, 1983; DUNGER, 1982; HÅGVAR, 1984; KOPESZKI, 1988). Die Bodentiere reagieren auf anthropogene Belastung sehr früh. Mit ihrer Hilfe lassen sich Schädigungen (Belastungen) rascher nachweisen als mit chemischen Analysemethoden (GHILAVOR, 1980). FUNKE (1987) hat auf den Zusammenhang von anthropogener Bodenbelastung und Veränderungen der Mesofauna hingewiesen. HÅGVAR (1984) zeigt in norwegischen Fichtenforsten, daß es säuretolerante und „acidophile" Collembolen gibt (HÅGVAR & ABRAHAMSEN, 1984). Von Buchenwaldökosystemen waren aber bisher kaum schadstoffspezifische Bioindikatoren bzw. Reaktionen von Bodentieren

auf solche Belastungen bekannt. Es ist ja erst in jüngster Zeit gezeigt worden, daß auch Laubbäume unter anthropogener Belastung leiden und erkranken.

Die vorliegende Studie zeigt nun mit Hilfe von Abundanz- und Dominanzwerten, welche drastischen faunistischen Veränderungen durch Säurebelastung im Ökosystem des Waldbodens verursacht werden.

4.2. Abundanz — Dominanz

Der erhöhte Protoneneintrag führt im allgemeinen zu einer Minderung der Abundanz (Bengtsson & Rundgren, 1988; Bengtsson *et al.*, 1988; Bååth *et al.*, 1980; Gill, 1969; Höfer, 1986; Sohlenius & Boström, 1986). Die Bodenfauna reagiert dabei schon auf sehr geringfüge Kontaminierung und erholt sich von Schädigungen nur sehr langsam (Hågvar, 1984).

Bei fortlaufender Säurebelastung, wie wir sie derzeit in verschiedenen Waldökosystemen haben, kann sich die Mesofauna schließlich überhaupt nicht mehr erholen. Die Abundanzgradienten unter den untersuchten Buchenbäumen zeigen, daß permanent belastete Bodenareale mit der Zeit nahezu ganz tierfrei bleiben. Diese Areale sind bei einigen untersuchten Bäumen praktisch faunistisch tot. Die parallel laufenden *p*H- und Abundanzgradienten zeigen, daß dies offensichtlich eine Folge der Säurebelastung (und eventuell auch der Schwermetallbelastung) ist.

Da die Mesofauna aber einen erheblichen Anteil an der Mineralisierung und Humifizierung der anfallenden organischen Substanzen hat (Anderson *et al.*, 1983; Bååth *et al.*, 1981; Crossley & Witkamp, 1966; Herlitzius, 1987; Ineson, Leonard & Anderson, 1982; Peterson & Luxton, 1982; Takeda, 1988; Tranvik *et al.*, 1989; Witkamp *et al.*, 1970) und der Element- sowie Energiefluß von ihnen katalysiert wird (Anderson *et al.*, 1983; Verhoef & Goede, 1985), muß die Folge der Entvölkerung eine Störung des Nährstoffkreislaufes sein. Wird das anfallende Laub längere Zeit nicht abgebaut, bildet sich eine Rohhumusauflage, der Boden wird „ausgelaugt“ und es kommt zu einem zusätzlichen Nährstoffmangel für die Bäume (Seastedt, 1984).

Das veränderte Dominanzgefüge ist ein deutliches Anzeichen für ein so schwer geschädigtes Ökosystem. Das einseitige Dominieren einzelner, sonst rezedenter Gruppen weist zudem darauf hin, daß solche Bodenökosysteme besonders anfällig sind.

Das Dominanzgefüge der Collembolen spiegelt geradezu den Versauerungsgrad des Bodens wieder. Mit Annäherung an den Einsickerungsbereich — wo er am höchsten ist — ändert sich ihre spezifische Zusammensetzung drastisch: das Dominanzgefüge wird praktisch umgedreht, indem die zuerst dominierenden Isotomiden immer seltener werden, die im Buchenwald (Wienerwald; Dobra-Urwald aus eigenen Untersuchungen) sonst nur rezedent vorkommenden Tullbergiinen hingegen klar dominieren. Diese faunistische Veränderung erfolgt derart kontinuierlich und parallel zur Versauerung im Bereich des Stammfußes, daß eine statistisch motivierte faunistische „Beurteilung und Bewertung“ von Buchenwaldböden gut möglich ist. Die Herausarbeitung solcher bodenzoologischer „Güteklassen“ ist auch ein Ziel der derzeit noch laufenden Studie.

4.3. Abundanz, Artendichte und Diversität der Collembolenarten

Die bis jetzt festgestellten 34 Arten entsprechen zwar nicht ganz den Angaben von Wolters (1983) für ein Buchenwaldökosystem (44 Arten); es wurden aber auch erst zwei Monatsserien komplett auf Artniveau aufgearbeitet. Auch die Abundanzwerte der Referenzfläche liegen unter den Angaben Wolters; ob dies standortspezifisch oder durch die Schadstoffbelastung auf der Exelbergfläche bedingt ist, kann erst nach einem Vergleich mit anderen Wienerwaldflächen festgestellt werden.

Das im Einsickerungsbereich nur ein bis drei Arten festgestellt werden konnten (max. 4000 Ind. $\times m^{-2}$), unterstreicht das schon Gesagte. Nur wenige Arten, wie zum Beispiel

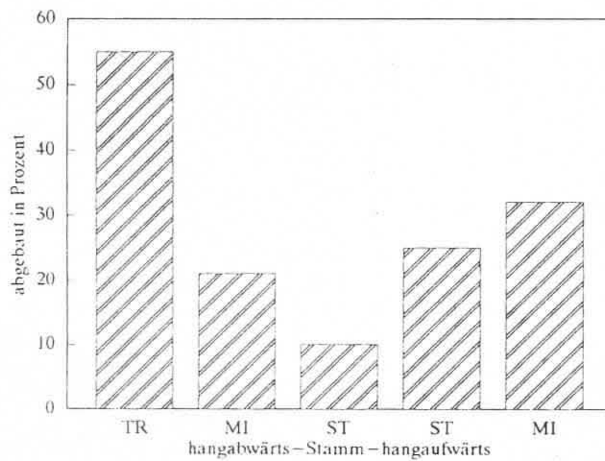


Abb. 8. Streuabbau (Testmaterial 1 g Hasellaub und 1 g Oblaten) nach dreimonatiger Versuchsdauer im Stammablaufbereich; (Legende wie Abb. 1).

Mesaphorura hylophila, haben – offensichtlich bedingt durch den Ausfall der Konkurrenz – einen Vorteil. Erst Laborversuche können hier abklären, ob diese Art vielleicht acidophil ist, oder durch ein besonderes Nahrungsangebot in den Baumfußtaschen (eventuell geänderte Mikroflora) diese Bereiche bevorzugt aufsucht. Im Einsickerungsbereich muß es aber auch aus faunistischen Gründen zu einer Störung des Nährstoffkreislaufes kommen (wie die erste Auswertung eines Streuabbauversuches entlang des *p*H-Gradienten zeigt; Abb. 8; weitere Ergebnisse werden gesondert publiziert). Außerdem haben GLATZEL & KAZDA (1985) nachgewiesen, daß eine Keimung von Buchensämlingen wegen der niedrigen *p*H-Werte in diesem Bereich nicht mehr möglich ist.

Artenzahl und Diversität der Collembolenzönosen entlang von Schadstoffgradienten können also für eine Bodenzustandsdiagnose herangezogen werden. Das gilt auch für andere Standorte im Wienerwald. Die Unterscheidung von „acidophilen" und acidotoleranten Collembolenarten sowie der Ausfall bestimmter Arten und Familien liefern leicht faßbare Indizien für eine Bodenzustandsdiagnose und erlauben Prognosen für die Bodenentwicklung: bei weiterer Versauerung, d. h. bei Ausbreitung der sauren Stammabläufe, werden im Laufe der Jahre die Collembolen- und ebenso die übrige Bodenmesofauna weiter verarmen, das Dominanzspektrum wird sich ändern und Streuabbau und Humifizierung werden noch stärker gestört werden, wenn nicht gar unterbunden.

5. Zusammenfassung

Der Stammablauf an den Buchen des Wienerwaldes bildet schon bei geringer Hangneigung im Boden einen Gradienten, dem entlang Bodenproben genommen wurden. Aus diesen wurde die Mesofauna entnommen und nach Großtaxa getrennt; die Collembolen wurden genauer, zum Teil auf Artniveaus, untersucht.

Die Säurebelastung und die damit verbundenen Veränderungen des Bodenzustandes führen zu deutlicher Abundanzminderung, Verringerung der Artenzahl und Abnahme der Diversität, in weiterer Folge auch zu eingeschränktem Streuabbau. Das Dominanzgefüge verändert sich im Einsickerungsbereich zugunsten einer Art, *Mesaphorura hylophila*. Die Kontaminierungszone um den Stammfuß erweist sich als ökologisch instabil und zumindest faunistisch schwerst gestört.

Die Mesofauna und speziell die Collembolen reagieren so sensibel auf die durch den sauren Stammablauf hervorgerufenen Bodenveränderungen, daß sie gut als Bioindikatoren für die Bodenzustandsdiagnose von Buchenwaldökosystemen herangezogen werden können. Von den 34 nachgewiesenen Arten ist *Mesaphorura hylophila* als zumindest acidotoleranter und in schadstoff- und

säurekontaminierten Bodenarealen in erhöhter Wohndichte auftretender Springschwanz zu bezeichnen. Hingegen sind *Isotomiella minor* und *Isotoma notabilis* jene Collembolen, die in „unbelasteten" Waldbodenarealen zwar dominieren, die aber versauerte Baumfußtaschen meiden.

6. Danksagung

Die Studie wurde im Auftrag der Gemeinde Wien, MA 22 durchgeführt. Herrn Prof. SCHALLER danke ich für die Durchsicht und Korrektur des Manuskripts; Herrn Dr. CHRISTIAN für die Hilfe bei den Determinationsarbeiten.

7. Literatur

ANDERSON, J. M., P. INESON & S. A. HUISH, 1983. Nitrogen und cation mobilization by soil fauna feeding on leaf litter and soil organic matter from decidous woodland. Soil Biol. Biochem. **15**, 463–467.

Anonym, 1987. Österreichische Forschungsinitiative gegen das Waldsterben. *In*: E. FÜHRER & F. NEUHUBER (Hrsg.), Ökologia 1987. Univ. f. Bodenkultur.

–, 1988. Symposium 27. & 28 Okt. 1988. Waldsterben in Österreich. Theorien, Tendenzen, Therapien.

BÅÅTH, E., B. BERG, U. LOHM, B. LUNDGREN, H. LUNDKVIST, T. ROSSWALL, B. SÖDERSTRÖM & A. WIREN, 1980. Effects of experimental acidification and liming on soil organisms and decomposition in a Scots pine forest. Pedobiologia **20**, 85–100.

–, U. LOHM, T. ROSSWALL, B. SÖDERSTRÖM & B. SOHLENIUS, 1981. Impact of microbial-feeding animals on total soil activity and nitrogen dynamics: a soil microcosm experiment. Oikos **37**, 257–264.

BECK, L., 1983. II. Terrestrische Ökosysteme. Zur Bodenbiologie des Laubwaldes. Verh. Dtsch. Zool. Ges. 37–54.

BENGTSSON, G., & S. RUNDGREN, 1988. The Gusum case: a brass mill and the distribution of soil Collembola. Can. J. Zool. **66**, 1518–1526.

– – M. BERDEN, 1988. Influence of soil animals on decomposition processes: a microcosm experiment. J. Environ. Qual. **17**, 113–119.

CROSSLEY, D. A., & M. WITKAMP, 1966. The role of arthropods and microflora in breakdown of white oak litter. Pedobiologia **6**, 293–303.

DUNGER, W. 1982. Tiere des Bodens als Leitformen für anthropogene Umweltveränderungen. Dechenia Beihefte, Bonn 26, 151–157.

FRITZLAR, F.,W. DUNGER & G. SCHÄLLER, 1986. Über den Einfluß von Luftverunreinigungen auf Ökosysteme. X. Collembolen im Immissionsgebiet eines Phosphat-Düngemittelwerkes. Pedobiologia **29**, 413–434.

FUNKE, W., 1986. Tiergesellschaften im Ökosystem „Fichtenforst" (Protozoa, Metazoa – Invertebrata) – Indikatoren von Veränderungen in Waldökosystemen. KfK-PEF **9**.

– 1987. Wirbellose Tiere als Indikatoren in Wäldern. VDI-Berichte **609**, 133–176.

GHILAROV, M. S., 1978. Bodenwirbellose als Indikatoren des Bodenhaushaltes und von bodenbildenden Prozessen. Pedobiologia **18**, 300–309.

– 1980. Bodenwirbellose als Bioindikatoren des Bodenhaushaltes und seiner Änderungen unter anthropogenen Einflüssen. Z. Bioindikation **1**, 3–9.

GILL, W., 1969. Soil microarthropod abundance following old-litter manipulation. Ecology **50**, 805–816.

GLATZEL, G. (Hrsg.), 1987. Möglichkeiten und Grenzen der Sanierung immissionsgeschädigter Waldökosysteme. Österr. FIW, Selbstverl. d. Ges. f. Waldökosystemforschung und experimentelle Baumforschung.

GLATZEL, G., & M. KAZDA, 1985. Wachstum und Mineralstoffernährung von Buche (*Fagus sylvatica*) und Spitzahorn (*Acer platanoides*) auf versauertem und schwermetallbelastetem Bodenmaterial aus dem Einsickerungsbereich von Stammablaufwasser in Buchenwäldern. Z. Pflanzenernähr. Bodenkd. **148**, 429–438.

GLATZEL, G., M. KAZDA & L. LINDEBNER, 1986. Die Belastung von Buchenwaldökosystemen durch Schadstoffdeposition im Nahbereich städtischer Ballungsgebiete: Untersuchungen im Wienerwald. Düsseldorfer Geobot. Kolloq. **3**, 15–32.

GLATZEL, G., M. KAZDA & M. SIEGHART, 1986. Zur Frage der Melioration versauerter Böden aus schadstoffbelasteten Buchenwäldern durch Zufuhr von Kalk oder halbgebranntem Dolomit. Ein Gefäßversuch mit Rotbuchen (*Fagus sylvatica*). Z. Pflanzenernähr. Bodenkd. **149**, 658–667.

HÅGVAR, S., 1984. Effects of liming and artificial acid rain on Collembola and Protura in coniferous forests. Pedobiologia 27, 341–354.
– & G. ABRAHAMSEN, 1984. Collembola in Norwegian coniferous forest soils. III. Relations to soil chemistry. Pedobiologia 27, 331–339.
HERLITZIUS, H., 1987. Decomposition in five woodland soils: relationships with some invertebrate populations and with weather. Biol. Fertil. Soil 3, 85–89.
HÖFER, H., 1986. Belastung und Belastbarkeit streuzersetzender Tiere durch Deposition von Luftverunreinigungen in Waldökosystemen. UBA Querschnittseminar 18, 101–112.
INESON, P., M. A. LEONARD & J. M. ANDERSON, 1982. Effects of collembolan grazing upon nitrogen and cation leaching from decomposing leaf litter. Soil. Biol. Biochem. 14, 601–605.
KAZDA, M., 1983. Schwermetalleintrag in das Buchenwaldökosystem des Wienerwaldes. Diplomarbeit Inst. Forstökologie Hochschule für Bodenkultur in Wien.
– & GLATZEL, G., 1984. Schwermetallanreicherung und Schwermetallverfügbarkeit im Einsickerungsbereich von Stammablaufwasser in Buchenwäldern (*Fagus sylvatica*) des Wienerwaldes. Z. Pflanzenernähr. Bodenkd. 147, 743–752.
–, – & I. LINDEBNER, 1986. Die Belastung von Buchenwaldökosystemen durch Schadstoffdeposition im Nahbereich städtischer Ballungsgebiete: Untersuchungen im Wienerwald. Düsseldorfer Geobot. Kolloq. 3, 15–32.
KOPESZKI, H., 1988. Populationsdynamik und Indikatorwert der Boden-Mesofauna im Einflußbereich des sauren Buchen-Stammablaufes. Zool. Anz. 221, 368–378.
–, F. SCHALLER & E. CHRISTIAN, 1987. Bodenzoologische Untersuchungen im Einflußbereich des Buchen-Stammablaufes. FIW-Ber 1987. *In:* E. FÜHRE & F. NEUHUBER (Hrsg.). Ergebnisse aus der Immissionsforschung: 82–88.
PETERSEN, H., & M. LUXTON, 1982. A comparative analysis of soil fauna populations and their role in decomposition processes. Oikos 39, 286–387.
PRASSE, J., 1980. Zur Bioindikation von Herbizideinflüssen mit Hilfe ökologischer Strukturen von endogäischen Mikroarthropodengesellschaften. Z. f. Bioindikation 4, 17–26.
SCHÄFER, H., 1986. Streuabbauverzögerungen durch Akkumulation von Schadstoffen in Buchenwäldern. Verh. Ges. Ökol. 14, 309–318.
SCHWERTFEGER, F., Lehrbuch der Tierökologie. Hamburg, 1978.
SEASTEDT, T. R., 1984. The role of microarthropods in decomposition and mineralization processes. Ann. Rev. Entomol. 29, 25–46.
SOHLENIUS, B., & S. BOSTRÖM, 1986. Short-term dynamics of nematode communities in arable soil – Influence of nitrogen fertilization in barley crops. Pedobiologia 29, 183–191.
TAKEDA, H., 1988. A 5 year study of pine needle litter decomposition in relation to mass loss and faunal abundances. Pedobiologia 32, 221–226.
TRANVIK, L., & H. EIJSACKERS, 1989. On the advantages of *Folsomia fimetaroides* over *Isotomiella minor* (Collembola) in a metal polluted soil. Oecologia 80, 195–200.
VERHOEF, H. A., & R. G. M. GOEDE, 1985. Effects of collembolan grazing on nitrogen dynamics in a coniferous forest. *In:* A. H. FITTER (ed.). Blackwell Scientific Publications, 367–376.
WITKAMP, M., & M. L. FRANK, 1970. Effects of temperature, rainfall and fauna on transfer of Cs (137), K, Mg and mass in consumer-decomposer microcosm. Ecology 51, 465–474.
WOLTERS, V., 1983. Ökologische Untersuchungen eines Buchenwaldes auf Kalk. Pedobiologia 25, 73–85.

Address: Dr. H. KOPESZKI, Zoologisches Institut der Universität Wien, Althanstr. 14, A-1090 Wien, Österreich.

Anhang: Artenliste der Collembolen vom 19. 11. 89, Exelberg.

Hypogastruridae
Ceratophysella denticulata (BAGNALL, 1941)
Onychiurinae
Onychiurus (Kalaphorura) paradoxus (SCHÄFFER, 1900)
Onychiurus (P.) armatus (TULLBERG, 1869)
Onychiurus granulosus STACH, 1930
Onychiurus (P.) sibiricus (TULLBERG, 1876)
Onychiurus sp. A.

Tullbergiinae
Mesaphorura hylophila RUSEK, 1982
Mesaphorura macrochaeta RUSEK, 1976
Mesaphorura krausbaueri-Gruppe [juv. oder indet.]
Mesaphorura tenuisensillata RUSEK, 1974
Neotullbergia tricuspis (BÖRNER, 1902); (GISIN, 1960)

Isotomidae
Folsomia manolachei BAGNALL, 1939

Folsomia quadrioculata (TULLBERG, 1871)
Folsomia sexoculata (TULLBERG, 1871)
Isotomiella minor (SCHÄFFER, 1896)
Isotoma notabilis SCHÄFFER, 1896

Entomobryidae

Entomobrya lanuginosa (NICOLET, 1842)
Orchesella spectabilis TULLBERG, 1871
Lepidocyrtus cyaneus TULLBERG, 1871
Lepidocyrtus lanuginosus (GMELIN, 1788)
Lepidocyrtus lignorum (FABRICIUS, 1775)
Lepidocyrtus violaceus (FOURCROY, 1785)
Lepidocyrtus sp. (sp. n.?)
Pseudosinella octopunctata BÖRNER, 1901
Pseudosinella wahlgreni (BÖRNER, 1907)

Tomoceridae

Tomocerus baudoti DENIS, 1932
Tomocerus flavescens (TULLBERG, 1871)
Tomocerus minor (LUBBOCK, 1862)
Tomocerus minutus TULLBERG, 1876

Neelidae

Neelus murinus FOLSOM, 1896
Megalothorax minimus WILLEM, 1990

Sminthuridae

Sphaeridia pumilis (KRAUSBAUER, 1898)